

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.01.020

基于原位观测的黄河水下三角洲悬浮物浓度叠加锯齿模型

朱超祁^{1,2}, 单红仙^{1,2}, 刘晓磊^{1,2}, 盛连成³, 邢聪聪⁴, 王振豪^{1,2}, 贾永刚^{1,2}

1. 中国海洋大学山东省海洋环境地质工程重点实验室, 青岛 266100

2. 海洋国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061

3. 中国石油工程建设公司华东环境岩土分公司, 青岛 266071

4. 国家海洋局北海环境监测中心, 青岛 266033

摘要: 利用海底原位三脚架搭载水动力观测仪器, 在黄河水下三角洲进行了为期 134 天的原位观测, 获取了该海域波浪、潮汐、海流、海水温度、浊度等相关数据。并利用观测点海域的表层沉积物进行室内测试, 发现该海域表层沉积物以粉砂为主, 悬浮物浓度与海水浊度存在良好的线性关系, 底层(距离海底约 50cm 处)悬浮物浓度在 2~4g/L 范围内变化。切应力计算结果与原位观测结果表明, 强浪过程中波浪对泥沙起动起控制作用, 进而显著提高悬浮物浓度; 其余时间段, 海流控制泥沙起动, 悬浮物浓度随流速动态波动。该海域悬浮物浓度表现为叠加锯齿模型。因波浪作用而形成大锯齿, 因海流作用而形成小锯齿。切应力计算结果可以较好地解释该模型。

关键词: 悬浮物浓度; 叠加锯齿模型; 波浪海流; 海底原位三脚架; 黄河水下三角洲

中图分类号: P753

文献标识码: A

The superposed sawtooth model of suspended sediment concentration in the Yellow River subaqueous delta based on in-situ observation

ZHU Chaoqi^{1,2}, SHAN Hongxian^{1,2}, LIU Xiaolei^{1,2}, SHENG Liancheng³,XING Congcong⁴, WANG Zhenhao^{1,2}, JIA Yonggang^{1,2}

1. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China

3. China Petroleum Engineering & Construction Corp. East China Environmental & Geotechnical Branch, Qingdao 266071, China

4. North China Sea Environmental Monitoring Centre, State Ocean Administration, Qingdao 266033, China

Abstract: The time series of waves, tides, currents, temperatures and turbidities were measured for 134 days in the Yellow River subaqueous delta with a submarine in situ tripod equipped by various instruments. The samples taken from the study site are analyzed in the laboratory for sediment grain size and the relationship between the suspended sediment concentration and turbidity. The sediment studied is mainly composed of silt, and a good linear relationship between the suspended sediment concentration and turbidity has observed. The suspended sediment concentration varies from 2 g/L to 4 g/L in the Yellow River subaqueous delta. Both the in-situ observation and the shear stress calculation show that the sharp rise in suspended sediment concentration is attributed to the episodic high waves, and the quotidian currents are responsible for the periodic fluctuation in suspended sediment concentration. Above all, a superposed sawtooth model of suspended sediment concentration influenced by waves and currents is proposed and the shear stress can explain the reason why episodic waves account for large sawteeth and currents are responsible for the small sawteeth.

Key words: suspended sediment concentration; superposed sawtooth model; waves and currents; submarine in-situ tripod; Yellow River subaqueous delta

资助项目: 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府海洋科学研究中心联合资助项目“海底边界层动态变化过程原位监测技术”(U1606401); 国家自然科学基金“复杂深海工程地质原位长期观测设备研制”(41427803)

作者简介: 朱超祁(1990—), 男, 博士生, 主要从事海底工程地质与原位观测研究, E-mail: george-zhu@foxmail.com

通讯作者: 贾永刚, yonggang@ouc.edu.cn

收稿日期: 2016-06-21; **改回日期:** 2016-12-28. 蔡秋蓉编辑

河口海岸地区悬浮物浓度(SSC)及其控制因素研究不仅有助于理解河口海岸带生态过程,也对沉积物侵蚀再悬浮、沉积、地貌演变与海岸工程具有借鉴与指导意义^[1]。黄河水下三角洲又因受黄河大量输沙影响,以高悬浮物浓度闻名于世,其悬浮物浓度变化研究备受关注。

近年来,形成了一系列针对水体悬浮物浓度的研究方法。利用数值模拟方法,可以突破悬浮物浓度研究的时空限制^[2],但其参数取值受人为因素影响较大。利用卫星遥感数据可以进行大范围水体悬浮物浓度估算^[3],但易受天气、海况、时间等因素影响,对一定水深的悬浮物浓度估算能力有限。借助科考船可以分析不同站位悬浮物浓度差异,进行悬浮物浓度剖面分析^[4,5],但受船时影响,无法进行长时间连续测量,并且为避免仪器触底,通常不能测量近海床悬浮物浓度。也有学者将遥感数据与船载观测数据联合分析,分析悬浮物浓度分布与季节变化^[6,7],但仍无法对近海床的悬浮物浓度进行详细研究。针对近海底悬浮物浓度研究,座底式原位观测装置的应用不失为一种行之有效的研究方法。

原位观测技术在国内的发展,为我国海域悬浮物浓度研究提供了一种有效的观测方法,实现了近海底水体的连续观测^[8]。李博闻等^[9]在黄河口潮滩进行了为期 9 天的原位观测;Yang 等^[10]在胶州湾潮滩地区进行了为期 7 天的观测;马小川等^[11]在北部湾进行了为期约 5 个月的观测;Zhu 等在辽宁白沙湾^[12]、渤海浅海区^[13]进行了海底原位观测,Liu 等^[14]在胶州湾进行了海底原位观测;徐景平等在南海深海区也进行了相关原位观测。

针对黄河水下三角洲的原位长期观测工作目前开展较少,本文利用黄河水下三角洲 134 天的原位观测数据,分析了波浪、海流对悬浮物浓度的影响,得出了该海域悬浮物浓度的叠加锯齿模型。

1 研究区域与观测过程

1.1 研究区域

本文海底原位观测三脚架站位(38.17°N、118.92°E)所在位置及水深如图 1 所示。该站位地处埭岛海域,水深约为 6.8m,地势大致东北高西南低。海底原位观测三脚架所处地势相对较高,其北侧约 50m 位置处存在海底洼地,水深约为 12m。海底原位三脚架附近 300m 范围内没有海底电缆和管道分布。根据现场钻孔资料,该站位表层约 5 米范

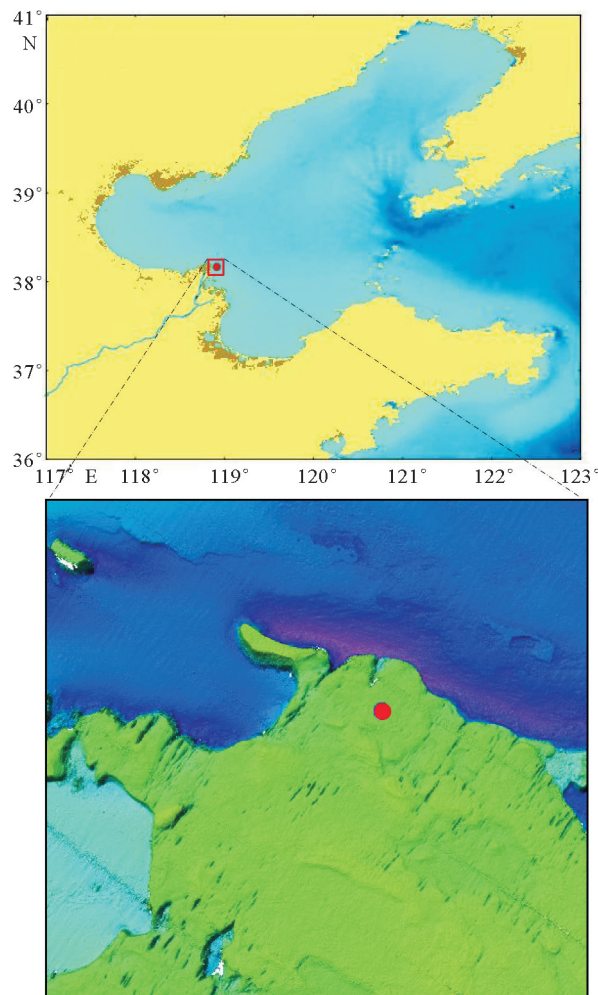


图 1 观测站位置与水深图

Fig.1 Location of and water depth in the study site

围内其沉积物均为黄褐色粉砂,平均含水量为 21.54%,平均密度为 2.01g/cm³,平均孔隙比为 0.64,塑性指数为 6.0,液性指数为 0.23,沉积物呈硬塑状态。

1.2 观测仪器与观测过程

此次黄河水下三角洲原位观测利用自主研发的海底原位三脚架作为观测仪器搭载平台(图 2)。该海底原位观测三脚架采用不锈钢制作,整体垂直高度为 1 米,观测仪器安装于搭载横梁之上。搭载仪器主要包括波潮仪(加拿大 RBR virtuoso,周期 1 小时,频率 2Hz)、电磁海流计(日本 COMPACT-EM,周期 30 分钟,频率 1Hz)、温盐深浊度计(加拿大 XR-620 CTD+Tu,周期 10 分钟,频率 1Hz)等。其中浊度传感器位于距海床 50cm 高度处。

海底原位观测三脚架于 2014 年 12 月 9 日布放于既定观测点。观测仪器提前一天设置采集参数,布放当天现场安装。混凝土配重与三脚架相连,防

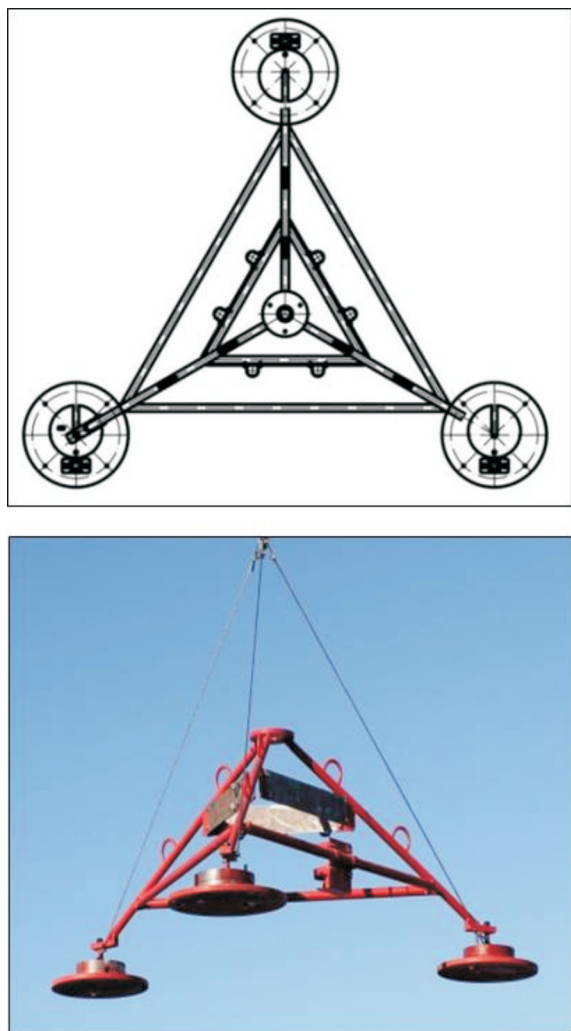


图 2 海底原位三脚架设计图(上)与实物图(下)

Fig.2 Diagram and photo picture of submarine tripod

止极端海况下,过强海流将三脚架移位。同时,混凝土配重与浮标\潜标相连,用以标识三脚架布放位

置,便于回收。观测仪器布置如图 3 所示。混凝土配重优先通过自动脱钩装置自海面释放,以自由下落方式触底;海底原位观测三脚架通过船载起吊装置平稳下落至海底后,由潜水员水下脱钩。海底原位观测三脚架于 2015 年 4 月 22 日成功回收,观测时间 134 天。

2 实验与观测结果

观测仪器布放期间,潜水员通过手持式沉积物取样器采集观测点少量表层沉积物与底层水样用于室内分析。据以确定所观测海域的表层沉积物粒度组成,以及悬浮物浓度与所测浊度的对应关系。

2.1 实验结果

粒度是沉积物的最基本物理特征,也是计算切应力的必需条件。根据 Shepard 提出的沉积物粒度划分方案,绘制观测站位海域表层沉积物的粒度三角图,如图 4 所示。图 4 显示观测点表层沉积物以粉砂为主,并含少量黏土质粉砂。通过累计曲线分布与差分计算,可确定该站位沉积物中值粒径为 0.023mm。

为确定观测点海域悬浮物浓度与浊度之间的对应关系,利用其表层沉积物与底层海水配置一系列不同浊度值悬浮液,通过便携式浊度仪(美国 HACH 2100Q,观测仪器布放前以将其与温盐深浊度计所测浊度值进行校正,两者相对误差小于 1.8%)测量其浊度,后经抽滤装置(中国 GM-0.33A+1L 溶剂过滤器)抽滤,分别称量抽滤前后

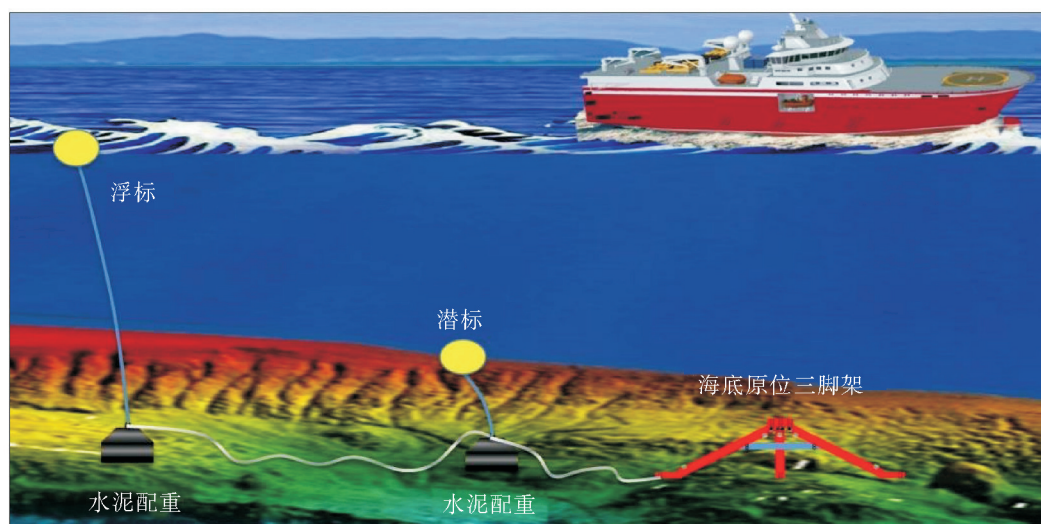


图 3 海底原位观测三脚架装置布置图

Fig.3 Submarine in situ tripod and layout

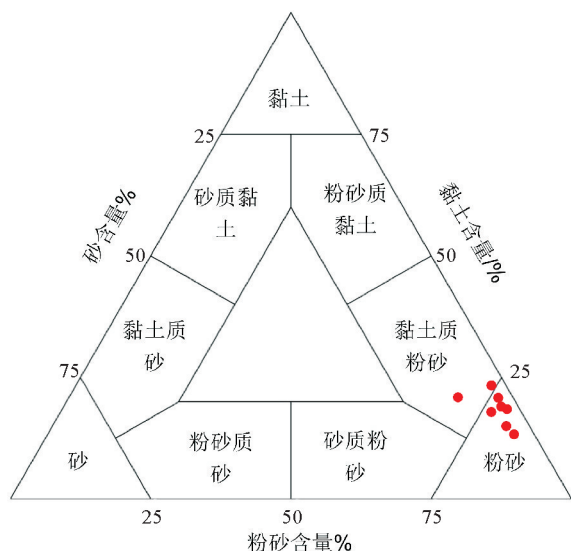


图4 沉积物粒度三角图

Fig.4 Triangular diagram for sediment classification

滤膜(50mm×0.45μm)干重,计算悬浮物质量并进而推算悬浮液浓度。为使浊度与悬浮物浓度的对应关系更加准确,实验室所配置悬浮液的浊度范围与原位观测的浊度范围基本保持一致。室内试验结果表明观测点海域水体浊度与悬浮液浓度存在良好的线性对应关系,如图5。据此可通过原位观测的海

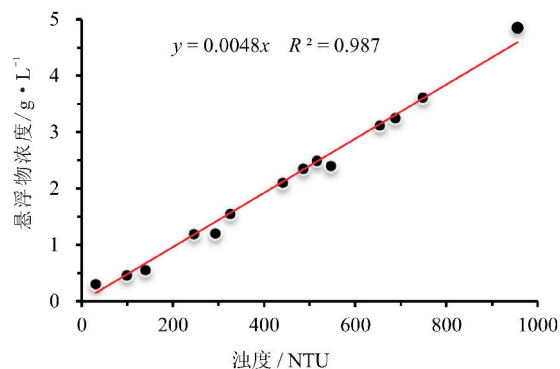


图5 悬浮物浓度与浊度对应关系

Fig.5 Relationship between SSC and turbidity

水浊度值反演悬浮物浓度。

2.2 观测结果

图6为2014年12月13—26日为期14天的观测结果。观测结果显示该海域水深范围为5~7m,一天之内存在两次涨退潮过程,该海域为不规则半日潮,涨潮方向为东北方向,退潮方向为西南,这可能与三脚架所处地势有关。另外,随观测时间增加,潮流流向规律性变弱,这可能与传感器漂移有关。

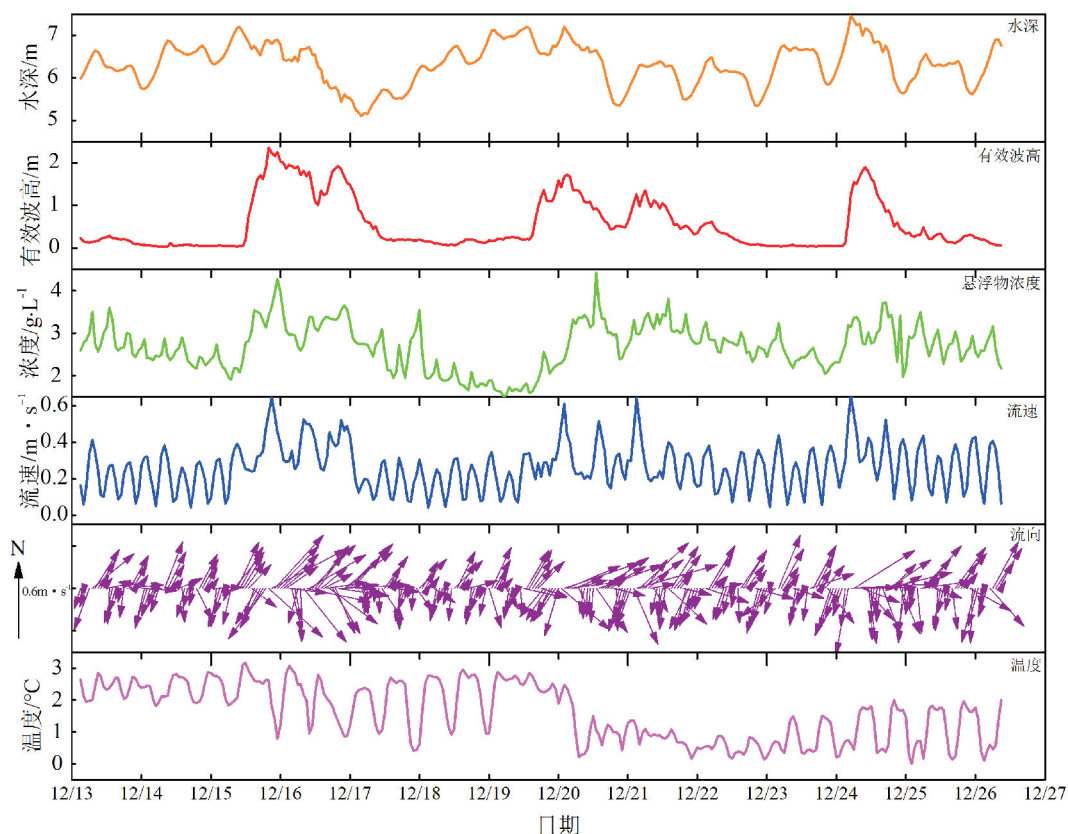


图6 黄河水下三角洲原位观测结果

Fig.6 In-situ observation results of in the Yellow River Subaqueous Delta

12月15—16日、20—21日、24日出现3次强浪过程,其有效波高接近或超过2米。利用所测海水浊度,经过数据反演推算观测期间水体悬浮物浓度。结果表明强浪期间,悬浮物浓度明显升高,其浓度峰值接近或超过4g/L,其余时间,最低悬浮物浓度仍维持在2g/L左右。距离海底50cm高度处的悬浮物浓度高于该海域常见海洋调查悬浮物浓度。考虑原因可能因为该次观测采用座底式原位观测三脚架,浊度传感器距离海床高度约为50cm,小于海洋调查中的2m。一般而言,悬沙浓度随水深并非线性增加,常呈现指数、对数、抛物线以及L型等分布形态,尽管不同学者提出了不同的分布形式,但大部分都表明悬沙浓度在距海床较近时发生突增,而非线性增加。另外,所测悬浮物浓度偏高也可能与三脚架阻挡浪、流,形成涡旋进而增大起砂能力有关。

流速一天之内存在约4次流速高值与4次流速低值,该观测点流速除与大/小潮期有关外,也受有效波高的影响,这可能与波浪导致的轨迹流速有关;底层海水温度变化范围为0~3℃,12月20日,海水温度明显下降,接近0℃但仍大于海水冰点,这表明观测期间,海水始终未出现结冰现象,从而证明该次观测原位期间不存在海冰阻碍波浪作用的时间段。

3 讨论

3.1 切应力分析

波高的量纲为L,流速的量纲为 LT^{-1} ,两者量纲不一致,无法直接对两者进行比较;将两者转化为相对应的切应力后,量纲统一为 $MT^{-2}L^{-1}$ 。切应力大小可以直接反映波浪、海流对沉积物的启动能力,继而影响悬浮物浓度。故波致切应力、流致切应力

可以在一定程度上反映波浪、海流对悬浮物浓度的影响能力。

本文波致切应力 τ_w 计算依据Jonsson等^[15]、Dufois等^[16]提出的波致切应力公式,详见公式(1);流致切应力 τ_c 依据Hawley^[17]提出的流致切应力计算,详见公式(2);临界切应力 τ_{cr} 依据Miller等^[18]提出的临界切应力公式计算,详见公式(3)。

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w \mu_w^2 \quad (1)$$

$$\tau_c = \rho \mu_s^2 \quad (2)$$

$$\tau_{cr} = \theta_{cr} (\rho_s - \rho) g d \quad (3)$$

式中, ρ 为海水密度, f_w 为波浪摩阻系数, μ_w 为波浪轨迹流速, μ_s 为海流底床剪切流速(可由据海床50cm处的观测流速值换算得到), θ_{cr} 为临界Shields数, ρ_s 为沉积物密度, g 为重力加速度, d 为沉积物粒径。

流致切应力、波致切应力计算结果如图7所示。强浪经过期间,该海域底床波致切应力可超过3Pa,其余时间段内,波致切应力较小,几乎为0。流致切应力在强浪经过期间,接近1Pa,但仍小于该时间段内的波致切应力;其余时间段内,流致切应力在0~0.5Pa范围内周期性波动,但远大于该时间段内的波致切应力,也大于中值粒径(0.023mm)对应的底床临界切应力0.045Pa。

通过切应力计算分析可知,强浪期间(有效波高大于或接近2m),波致切应力大于流致切应力,波浪对该海域泥沙启动起控制作用,进而显著提高悬浮物浓度。其余时间段内,波浪对悬浮物浓度的影响作用微弱,海流对泥沙启动其控制作用,悬浮物浓度随流速动态波动。

3.2 悬浮物浓度叠加锯齿波模型

通过切应力分析,可以得出有效波高大于或接

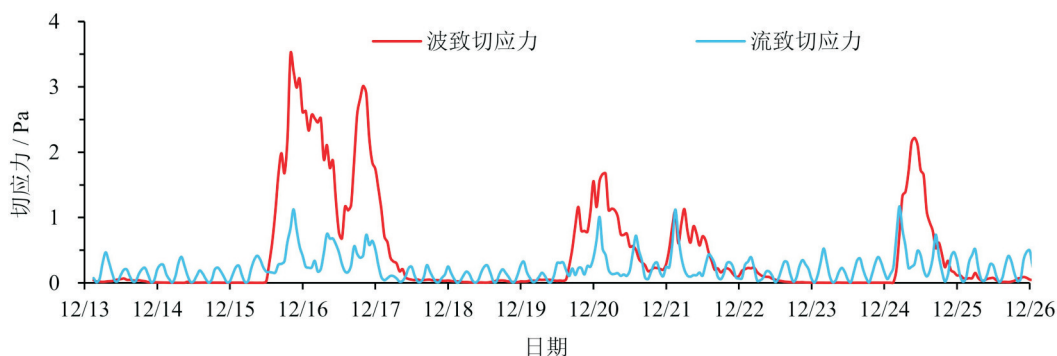


图7 切应力计算结果

Fig.7 The wave-induced shear stress and current-induced shear stress

近 2m 时,波致切应力超过 3Pa,远大于临界切应力,表层沉积物大量悬浮,导致悬浮物浓度急剧增高,如图 6 所示。强浪过后,波高迅速恢复至原先较低水平值,而悬浮物浓度并未呈现类似现象,而是在以特定速率缓慢降低,呈锯齿状,该锯齿状受强浪控制。

图 6 显示,强浪过后,悬浮物浓度并非以斜线或者类似斜线形式降低,而呈振荡式下降,即大锯齿之上分布有小锯齿。悬浮物浓度下降可以归因于重力作用下悬浮物沉降。波浪无法解释呈现振荡式下降

现象,因此时波致切应力接近于 0。图 6、图 8 显示悬浮物浓度的小锯齿振荡周期与流速波动周期基本一致,即一天之中存在 4 次明显波动。且流速高时,悬浮物浓度上升,流速低时,悬浮物浓度降低,这与刘潇等^[19]的观测趋势一致,但本文悬浮物浓度较高,这可能与悬浮物浓度的垂向分布规律有关,悬浮物浓度近底时通常会突增^[20-22]。通过上述计算与切应力分析可以推断,当波高较小时,悬浮物浓度主要受流速控制,这与切应力分析结果基本一致。

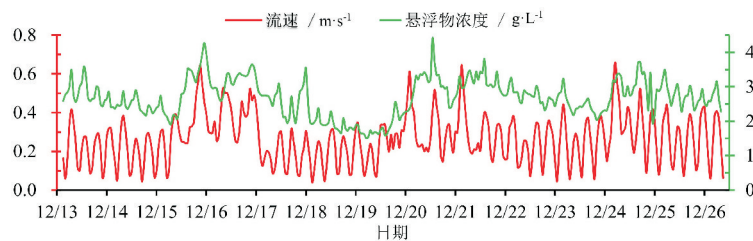


图 8 流速与悬浮物浓度对比分析图

Fig.8 The current velocity and suspended sediment concentration

据此得出该海域悬浮物浓度呈现叠加锯齿变化模式。强浪作用时,悬浮物浓度因波浪作用形成大锯齿,强浪消失时,悬浮物浓度因海流作用形成小锯齿,且在重力作用下,悬浮物浓度呈现下降趋势,如图 9 所示。大锯齿出现频率取决于强浪出现频率,小锯齿出现频率取决于潮汐类型。半日潮海区,悬浮物浓度一天存在 4 次波动;全日潮海区,悬浮物

浓度一天存在两次波动。悬浮物浓度叠加锯齿模型以时间为轴展开,是一种动态变化模型。

4 结论

(1)该海域表层沉积物以粉砂为主,悬浮物浓度与海水浊度存在良好的线性关系,底层(距离海床约 50cm 处)悬浮物浓度在 2~4g/L 范围内波动。

(2)切应力计算结果表明有效波高大于或接近 2m 时,波浪对该海域泥沙起动起控制作用,进而显著提高悬浮物浓度;其余时间段内,海流对泥沙起动起控制作用,悬浮物浓度动态波动。

(3)该海域悬浮物浓度变化表现为叠加锯齿模式。因波浪作用而形成大锯齿,因海流作用而形成小锯齿。切应力计算结果可以很好地解释悬浮物浓度的叠加锯齿模型。

致谢:原位观测实施过程得到了张少同、文明征、季福东以及国家海洋局第一海洋研究所的帮助,在此表示感谢;同时感谢审稿专家认真细致的修改建议。

参考文献 (References)

- [1] Yang S L, Zhang J, Zhu J. Response of suspended sediment concentration to tidal dynamics at a site inside the mouth of an

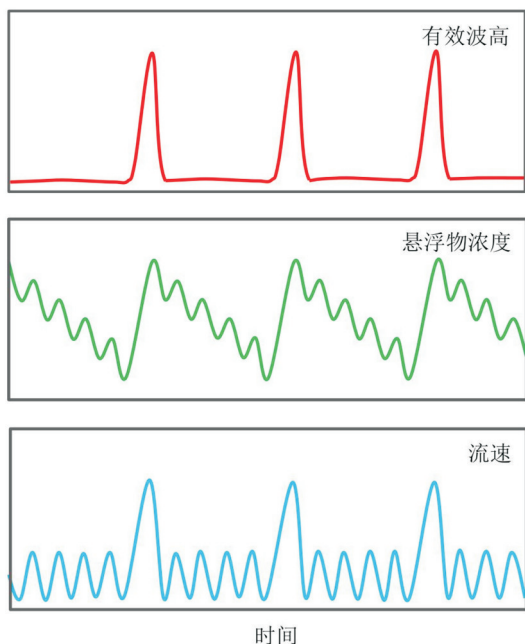


图 9 悬浮物浓度叠加锯齿模型图

Fig.9 The superposed sawtooth model of SSC

- inlet; Jiaozhou Bay (China)[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2004, 8(2): 170-182.
- [2] 乔璐璐, 史经昊, 高飞, 等. 我国陆架泥质区沉积动力数值模拟研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(3): 155-166. [QIAO Lulu, SHI Jinghao, GAO Fei, et al. Numerical simulation of sediment dynamic processes for mud areas on the east china sea continental shelves: A review[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(3): 155-166.]
- [3] 毕世普, 胡刚, 何拥军, 等. 近20年来长江口表层悬沙分布的遥感监测[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(5): 17-24. [BI Shipu, HU Gang, HE Yongjun, et al. Remote sensing monitoring of surface suspended sediments at Yangtze estuary in the past two decades[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(5): 17-24.]
- [4] 李建超, 乔璐璐, 李广雪, 等. 基于 LISST 数据的冬季南黄海悬浮体分布[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(5): 13-25. [LI Jianchao, QIAO Lulu, LI Guangxue, et al. Distribution of winter suspended particulate matters in the south yellow sea based on LISST data[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(5): 13-25.]
- [5] 邵和宾, 范德江, 麦晓磊, 等. 长江口典型断面悬浮体颗粒类型与粒级构成及其影响因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(3): 47-56. [SHAO Hebin, FAN Dejiang, MAI Xiaolei, et al. Types and size of suspended particles in a typical cross section at the Changjiang estuary and influence factors[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(3): 47-56.]
- [6] 肖合辉, 王厚杰, 毕乃双, 等. 渤海海域悬浮体季节性分布及主要运移路径[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(2): 11-21. [XIAO Hehui, WANG Houjie, BI Naishuang, et al. Seasonal variation of suspended sediment in the Bohai and Yellow Sea and the pathway of sediment transport[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(2): 11-21.]
- [7] 余佳, 王厚杰, 毕乃双, 等. 基于 MODIS L1B 数据的黄海悬浮体季节性分布的反演[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(1): 1-9. [YU Jia, WANG Houjie, BI Naishuang, et al. Seasonal distribution and variation of suspended sediment in the Yellow Sea in 2010 based on retrieved monthly data from MODIS L1B imagery[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(1): 1-9.]
- [8] 李建如, 徐景平, 刘志飞. 底基三脚架在深海观测中的应用[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(5): 559-565. [LI Jianru, XU Jingping, LIU Zhifei. Applications of tripods to deep-sea observation[J]. *Advance in Earth Science*, 2013, 28(5): 559-565.]
- [9] 李博闻, 单红仙, 张少同, 等. 波浪与潮流对潮滩悬沙含量贡献的现场观测[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(3): 183-190. [LI Bowen, SHAN Hongxian, ZHANG Shaotong, et al. Contribution of waves and currents to sediment suspension revealed by in-situ observation[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(3): 183-190.]
- [10] Yang S L, Li P, Gao A, et al. Cyclical variability of suspended sediment concentration over a low-energy tidal flat in Jiaozhou Bay, China: effect of shoaling on wave impact[J]. *Geo-Marine Letters*, 2007, 27(5): 345-353.
- [11] 马小川, 范奉鑫, 阎军. 海洋沉积动力过程原位监测平台及其应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(4): 179-185. [MA Xiaochuan, FAN Fengxin, YAN Jun. In-situ monitoring platform for marine sediment dynamics and its application[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(4): 179-185.]
- [12] Zhu C Q, Jia Y G, Liu X L, et al. Influence of waves and currents on sediment erosion and deposition based on in-situ observation: case study in Baisha Bay, China[J]. *Journal of Marine Environmental Engineering*, 2017, 10(1): 29-43.
- [13] Zhu C Q, Jia Y G, Wang Z H, et al. Dynamics of bottom boundary layers in the yellow river subaqueous delta based on long-term in-situ observations [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2017, 91(1): 369-370.
- [14] Liu X L, Zhu C Q, Zheng J W, et al. The observations of seabed sediment erosion and resuspension processes in the Jiaozhou Bay in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(11): 79-85.
- [15] Jonsson I G. Wave boundary layers and friction factors[J]. *Coastal Engineering Proceedings*, 1966, 10: 127-148.
- [16] Dufois F O, Garreau P, Le Hir P, et al. Wave-and current-induced bottom shear stress distribution in the Gulf of Lions [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(15): 1920-1934.
- [17] Hawley N. Sediment resuspension near the Keweenaw Peninsula, Lake Superior during the fall and winter 1990-1991[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2000, 26(4): 495-505.
- [18] Miller M C, Mccave I N, Komar P D. Threshold of sediment motion under unidirectional currents [J]. *Sedimentology*, 1977, 24(4): 507-527.
- [19] 刘潇, 冯秀丽, 刘杰, 等. 山东半岛靖海湾及其附近海域悬浮泥沙分布与变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(6): 9-15. [LIU Xiao, FENG Xiuli, LIU Jie, et al. Spatial and temporal distribution pattern of suspended sediment in the Jinghai Bay and adjacent waters, Shandong Peninsula [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 9-15.]
- [20] 杨华, 赵冲久, 侯志强, 等. 粉沙质海岸波浪和潮流作用下泥沙垂线分布研究[J]. *水道港口*, 2006, 27(3): 142-146. [YANG Hua, ZHAO Chongjiu, HOU Zhiqiang, et al. Study on sediment vertical distribution under the wave and current of silt coast[J]. *Journal of Waterway and Harbour*, 2006, 27(3): 142-146.]
- [21] 左书华, 李九发, 万新宁, 等. 长江河口悬沙浓度变化特征分析[J]. *泥沙研究*, 2006(3): 68-75. [ZUO Shuhua, LI Jiufa, WAN Xinning, et al. Characteristics of temporal and spatial variation of suspended sediment concentration in the Changjiang Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2006(3): 68-75.]
- [22] 于月倩, 许国辉, 赵庆鹏, 等. 底床粉质土液化下波动水体含沙量垂向 L 型分布特征试验研究[J]. *海洋学报*, 2010, 32(6): 144-151. [YU Yueqian, XU Guohui, ZHAO Qingpeng, et al. An experiment study on L-shaped vertical characteristics of suspended sediment content on the liquefied silty soil bed [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(6): 144-151.]